

一种Grangeat圆轨迹锥束CT重建阴影区域填充方法*

郑 晗²⁺, 陈自宽¹, 康 雁^{1,3}, 刘积仁^{2,3}

¹(东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

²(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

³(东软集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

Shadow Zone Padding Method for Grangeat Reconstruction of Circular Cone-Beam CT

ZHENG Han²⁺, CHEN Zi-Kuan¹, KANG Yan^{1,3}, LIU Ji-Ren^{2,3}

¹(Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

²(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

³(Neusoft Group Ltd., Shenyang 110179, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhenghan0513@gmail.com

Zheng H, Chen ZK, Kang Y, Liu JR. Shadow zone padding method for Grangeat reconstruction of circular cone-beam CT. Journal of Software, 2009,20(5):1166–1175. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3545.htm>

Abstract: Based on the analysis of the shadow zone and the padding methods of the Radon domain generated by circular cone-beam CT scanning, this paper proposes a shadow zone padding method by distance-weighted interpolation. The method uses the known boundary data to interpolate the missed data inside the shadow zone with a distance weighting function. Simulation results show that the proposed padding method shows some advantages over the constant padding technique in terms of data-padding accuracy, artifacts reduction and image reconstruction for large cone-angle cone-beam scanning. The data padding method is particularly useful in Grangeat reconstruction algorithm. It enlarges the applicable scope of circular cone-beam tomography.

Key words: Grangeat reconstruction algorithm; cone-beam tomography; circular scan; Radon domain; shadow zone padding

摘 要: 通过分析圆轨迹锥束 CT(cone-beam CT,简称 CBCT)扫描 Radon 域的数据缺失问题,比较了前人提出的 Radon 阴影区域数据缺失填充方法的特点,提出了一种基于距离权重变量的阴影区域填充方法.该方法采用阴影区域边界数据作为数据源,以距离作为权重函数计算填充数据.计算机模拟重建实验表明,所提出的方法在填充数据准确度、减少伪影、大锥角图像重建等方面比简单的常数填充法以及衍生算法效果更好.该填充方法特别适用于 Grangeat 类锥束 CT 重建算法,拓展了圆周锥束 CT 的实际应用范围.

关键词: Grangeat 重建算法;锥束重建;圆轨迹扫描;Radon 区域;阴影区域填充

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

锥束 CT(cone-beam CT,简称 CBCT)代表了目前 CT 发展的前沿方向,其各向同性空间分辨率特性为 CBCT

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.30770591 (国家自然科学基金)

Received 2008-09-23; Accepted 2008-12-15

的临床研究开辟了一片广阔的空间.锥束 CT 重建算法是目前锥束 CT 理论研究的焦点.由于圆扫描轨迹实现简单、应用范围广、机械误差小,所以,基于圆周扫描轨迹的锥束重建算法也倍受关注.目前,基于圆轨迹扫描的锥束 CT 重建的主流算法是原理简单、重建速度较快的 FDK 算法^[1].但由于圆轨迹扫描并不能完全满足三维精确重建条件^[2],所以,采用 FDK 算法重建的图像在高纬度区域会产生密度衰减伪影.为了改善 FDK 算法在高纬度区域的重建效果,学者们提出了许多 FDK 类改进算法,如 P-FDK^[3],HT-FDK^[4],Hu-FDK^[5]以及 NHW-FDK^[6],等.这些算法的中心思想都是通过一些操作来减少高纬度区域内不精确重建形成的伪影,但并没有将圆轨迹扫描固有的阴影区域填充满,所以改善效果有限.2003 年,Chen 教授提出了对二维 Radon 数据插值以及填充以改进二维 Radon 数据分布的方法^[7],并获得了很好的重建效果.这为 Radon 用于高纬度区域的插值提供了参考方法,也为本文三维 Radon 阴影区域的填充提供了理论基础.1990 年,Grangeat 指出了三维 Radon 数据的导数与投影数据的关系,从而提出 Grangeat 重建算法^[8].Grangeat 重建算法只有在锥角很小的时候可以看作一种精确的重建算法,在目前平板探测器锥角很大的情况下,这个条件不再成立.这里研究的是一种近似重建算法,主要目的是观测在大锥角下再现物体内部的精细结构、锥束 CT 中采用的平板探测器像素越来越小、锥角越来越大的情况,这个问题仍然是快速重建的一个挑战性问题.2003 年, Lee 优化了 Grangeat 重建算法,将其应用于圆轨迹锥束 CT 重建,提出了常数阴影区域填充的方法^[9],并将其推广到圆轨迹半扫描锥束 CT 重建^[10]以及螺旋轨迹半扫描重建^[11]中,获得了很好的效果.其研究表明,Grangeat 类重建算法的特点在于,重建过程中可再现三维 Radon 区域数据和圆轨迹阴影区域,这为三维 Radon 数据填充提供了前提条件.

1 Grangeat 锥束重建算法

1.1 Grangeat 算法的理论基础

Grangeat 于 1991 年提出了一种崭新的重建思路.他发现,三维 Radon 空间数据导数与投影数据导数存在一定的联系,并指出通过一定的推导和重排可以通过三维 Radon 数据重建成像物体.Grangeat 重建算法的理论基础起源于投影数据一阶导数的线积分与 Radon 数据导数的几何关系.该几何关系如图 1 所示.

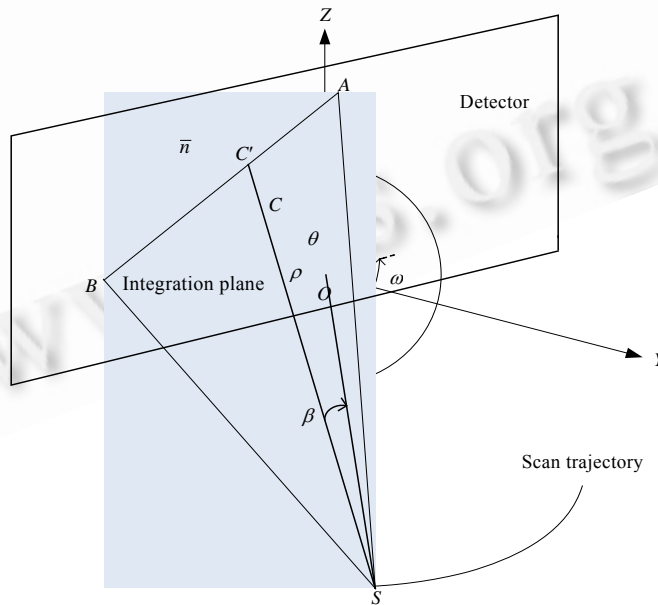


Fig.1 Geometrical relationship of the 3D Radon data and projection data

图 1 三维 Radon 数据与投影数据的几何关系

如图 1 所示, S 为扫描轨迹上的任意一点, O 是三维空间原点, C 为三维 Radon 空间中任意一点, 平面 SAB 是

由射线源出发,经过 C 点并垂直于向量 \bar{n} 的平面,并与虚拟探测器平面相交于直线 AB .Grangeat 在研究中发现, C 点 Radon 数据的导数与探测器相应直线的线积分存在联系.也就是说,通过计算虚拟探测器平面投影数据 AB 的线积分可以得到三维 Radon 空间中任意一点 C 的值.其具体联系如公式(1)所示.

$$\frac{\partial}{\partial \rho} Rf(\rho \bar{n}) = \frac{1}{\cos^2 \beta} \frac{\partial}{\partial s} \int_{-\infty}^{\infty} f_w[s(\rho \bar{n}), t] dt \quad (1)$$

其中, $f_w[s(\rho \bar{n}), t]$ 表示直线 AB 的投影值, β 表示射线与中心射线的夹角,而 $\frac{\partial}{\partial \rho} Rf(\rho \bar{n})$ 表示三维 Radon 数据的一阶导数.而 Grangeat 算法的中心思想也来自于采用直线 AB 的线积分来代替平面 SAB 的面积分.由公式(1)可知,通过计算直线 AB 上投影数据的线积分即可获得三维 Radon 空间中的数据.如果三维空间中的 Radon 数据完全被采集到,通过 Radon 逆变换将会精确重建出待重建物体,其公式可以表示为

$$f(\bar{x}) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} Rf((\bar{x} \cdot \bar{n})\bar{n}) |\sin \theta| d\varphi d\theta \quad (2)$$

其中, θ 表示三维 Radon 空间任意一点与 z 轴的夹角, φ 表示投影角, $\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} Rf((\bar{x} \cdot \bar{n})\bar{n})$ 表示三维 Radon 数据的二阶导数.通过三维逆 Radon 变换的物理意义可知,三维空间中的任意一点的数值,是以原点和该点为直径的三维 Radon 数据二阶导数球壳之和.所以,Grangeat 算法采用公式(2)将三维 Radon 数据的二阶导数与三维待重建物体联系在一起.可以发现,整个重建算法的推导与计算均采用三维 Radon 变换理论,并且所有步骤可逆,这表明 Grangeat 算法在理论上的精确性.

1.2 Grangeat算法的计算机实现

通过第 1.1 节的分析可知,Grangeat 算法基本上可被分解为 3 大步骤:(1) 求特征点的 Radon 数据;(2) 沿极径方向求导;(3) 对于 Radon 数据反投影.其具体流程如下:

Rawdata weighting:

```
For (iRowLoop=0;iRowLoop<iRow;iRowLoop++)
  For (iChannelLoop=0;iChannelLoop<iChannel;iChannelLoop++)
    {
      Setup the weighting function;
      For (iViewLoop=0;iViewLoop<iView;iViewLoop++)
        {
          Weighting Rawdata;
          Calculate horizontal and vertical derivatives;
        }
    }
}
```

Radon data calculating:

```
For (ProjectionAngle=0;ProjectionAngle<View;ProjectionAngle++)
  For (RadonSita=0;RadonSita<numSita;RadonSita++)
    {
      For (Radonro=0;Radonro<numro;Radonro++)
        {
          Calculate the characteristic point  $C'$  of  $C$ ;
          Setup the line integration;
          Do line integration;
          Do padding;
        }
    }
}
```

Do first derivative alone ρ ;

}

}

Back projection;

整个重建分为两次求导以及一次反投影,当光源无限远时,X 射线可以看作平行照射,而与探测器相交于一条直线.对直线上点的线积分可以代表几分平面的面积分,这样,Grangeat 就将三维 Radon 数据与探测器投影数据结合在一起.于是,公式(2)中的 $\frac{\partial}{\partial \rho} Rf((\bar{x} \cdot \bar{n})\bar{n})$ 可以表示为

$$\frac{\partial}{\partial \rho} Rf((\bar{x} \cdot \bar{n})\bar{n}) = \frac{1}{\cos^2 \beta} \frac{\partial}{\partial s} \int_{-\infty}^{+\infty} X_w f[(s(\rho\bar{n}), t)] dt \quad (3)$$

其中, X_w 表示几何校正权重,该权重与 FDK 类重建算法中的几何校正权重相同. $f[(s(\rho\bar{n}), t)]$ 表示投影数据, $s(\rho\bar{n})$ 是积分平面与探测器平面的交线,积分沿交线计算,采样间隔为 t .步骤 2 后会产生 Radon 数据在子午面上的图像,可以确定圆轨迹阴影区域位置,并可采用 Padding 方法填充阴影区域.最后,将数据反投影到重建点即可得到重建图像.

2 圆轨迹扫描阴影区域的产生以及填充方法

2.1 圆轨迹扫描阴影区域

光源和探测器围绕物体进行圆轨迹扫描是 CT 领域中最常用的扫描方式,其扫描方式的特点是,待检测物体置于 CT 的旋转中心位置,探测器与 X 射线源环绕待检测物体完成扫描.由于圆轨迹扫描没有 z 轴方向的位移,不会引入 z 轴方向的运动偏差,同时,圆周运动具有较高运动稳定性和简单的机械结构,圆轨迹扫描方式被广泛地使用.由于锥束 CT 的特点,圆轨迹扫描更有助于发挥其全三维特性.所以,基于圆轨迹扫描的锥束重建算法也成为重建算法研究的焦点.基于圆轨迹锥束 CT 结构如图 2 所示.

如图 2 所示,锥束扫描结构采用 z 轴方向覆盖较大的二维探测器,X 射线源围绕旋转中心执行圆周运动.为便于理解和推导,在旋转中心位置引入虚拟探测器,其大小与实际探测器成几何比例关系.由于锥形 X 射线源具有三维空间的发散性,所以,基于圆周的锥束扫描结构并不能完全满足三维精确重建条件.当锥角增大时,Radon 数据会产生缺失,并且锥角越大,数据缺失情况越严重.其具体情况如图 3 所示^[8].

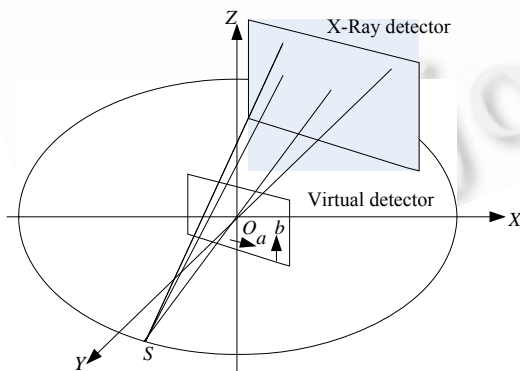


Fig.2 Structure of circular cone-beam CT scan

图 2 圆轨迹锥束扫描结构

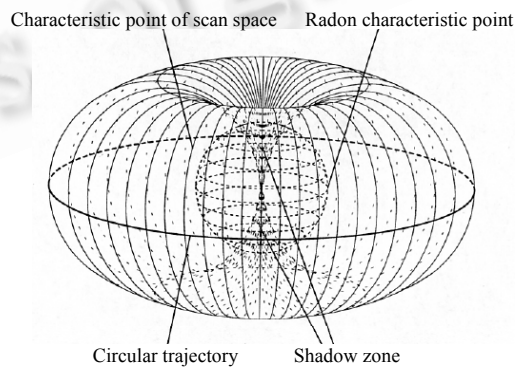


Fig.3 Shadow zone of circular scan

图 3 圆轨迹扫描阴影区域

由图 3 可以看出,圆轨迹扫描采集到的数据在 z 轴方向上存在着较大的阴影区域,整个区域类似面包圈结构,其大小可以定义为 $|\rho| > SO|\sin\theta$,其中, ρ 表示图 1 中三维 Radon 区域中数据点的极径, θ 表示极角.其中,阴影区域的 Radon 数据是圆轨迹扫描无法采集到的,而 FDK 类算法将这些区域简单地填充为 0.这就是 FDK 类算法在

高纬度区域产生密度衰减伪影的主要原因.由于 Grangeat 重建算法的特点,在重建过程中需要通过投影数据的一阶导数作积分来获得三维 Radon 数据.所以,Grangeat 方法可以轻松地确定阴影区域的具体位置及大小,并可以采用 Radon 区域外推填充的方法将阴影区域数据补充完整,这样就会降低甚至消除圆轨迹扫描高纬度密度衰减伪影.

2.2 基于极角常数的填充方法

最简单也最直接的方式就是常数填充方法,其思想是采用对应阴影区域边界点数据将阴影区域数据填满,以达到较好的重建效果.由于三维 Radon 数据采用极坐标表示,其变量分别为极径 ρ 和极角 θ ,故常数填充方法分为极角常数填充方法和极径常数填充方法两类.基于极角常数填充如图 4 所示.

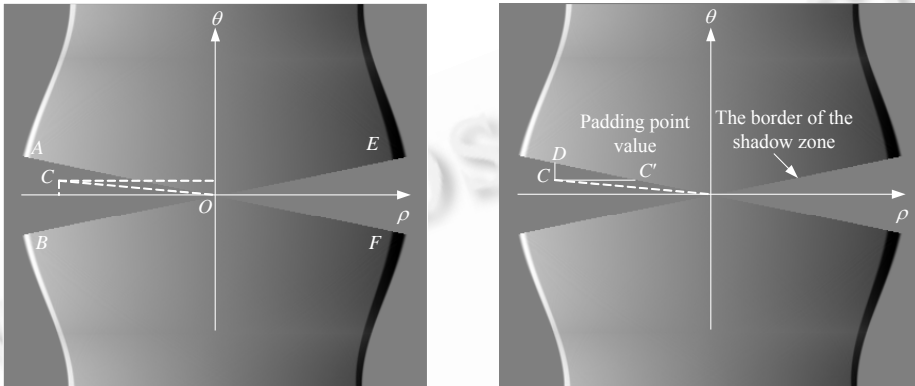


Fig.4 Polar angle constant padding

图 4 极角常数填充

图 4 为 Radon 数据导数在子午面的图像,其中横轴为极径,纵轴为极角.阴影区域被定义为两个以 θ 为对称轴的三角区域 AOB 与 EOF .对于阴影区域中任意一点 C ,对应的极角与极径分别为 ρ_{shadow} 和 θ_{shadow} .极角常数填充即采用 C' 点的边界数据填充 C 点数据,如公式(4)所示.

$$Rf'(\rho_{shadow}\bar{n}, \theta_{shadow}) = Rf'(\rho\bar{n}, \theta_{shadow}) \tag{4}$$

其中,

$$|\rho| = SO|\sin(\theta_{shadow})| \tag{5}$$

极角常数填充方法是采用公式(5)计算出阴影区域边界点,即图 4 中 C' 的值,然后采用该值填充阴影区域对应点 C 的值.整个过程中,极角数值保持不变.根据 Lee^[8]的研究成果,采用这种填充方法对高纬度密度衰减伪影有抑制作用.然而,如图 4 可知, $|CD| < |CC'|$,故 C' 对 C 的影响小于 D 的影响.所以,单纯采用 C' 的值填充 C 不够准确,在高纬度区域中,仍存在图像密度降低的现象.

2.3 基于极径常数的填充方法

基于极径填充的方法与基于极角的填充方法类似,都采用阴影区域边界数据进行填充.所不同的是,基于极径的填充方法采用 ρ 固定 θ 变换的方式执行填充.基于极径常数填充如图 5 所示.

由图 5 可知,对于阴影区域中的一点 C ,与其极径相同,极角距离最近的边界点为 D .极径常数填充方式采用特征点 D 填充 C 点的数值,如公式(6)所示.

$$Rf'(\rho_{shadow}\bar{n}, \theta_{shadow}) = Rf'(\rho_{shadow}\bar{n}, \theta_D) \tag{6}$$

其中,

$$\theta_D = \sin^{-1}\left(\frac{\rho_{shadow}}{SO}\right) \tag{7}$$

公式(6)、公式(7)表明,基于极径常数的填充方法是采用极径数值固定、极角变化的方式寻找阴影区域外

边界点,并用边界点的数值填充阴影区域对应点.根据 Lee 的研究成果,采用这种填充方法能够完全抑制高纬度区域密度衰减伪影.但是,该方法与极角常数填充方式存在同样的问题,当 $|CD| > |CC'|$ 时, D 点的值并不能完全代表 C 数值,所以在高纬度区域,图像会引入高密度伪影.

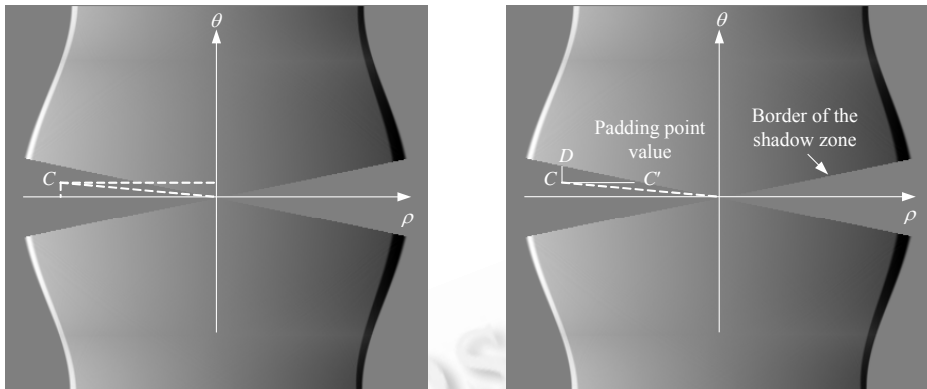


Fig.5 Polar radius constant padding

图 5 极径常数填充

3 基于距离权重的填充方法

由于第 2.2 节和第 2.3 节中的填充方法均存在不足,所以本文提出一种基于距离权重的动态阴影区域填充方法.经过研究发现,Radon 数据具有一定的相关性,其变化也存在一定的规律性,如图 6 所示.

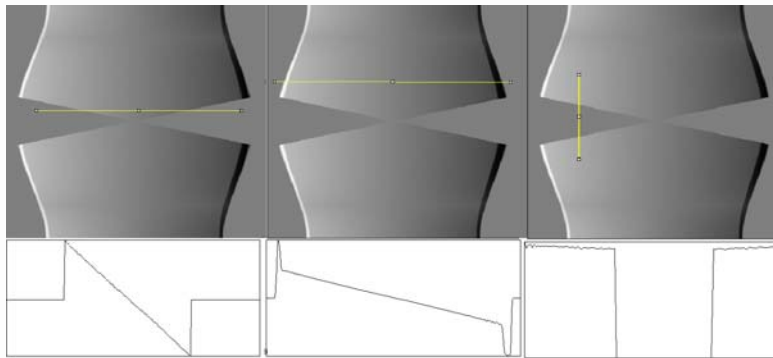


Fig.6 Profile of the first derivative of 3D Radon data

图 6 三维 Radon 数据一阶导数分布曲线

由图 6 可知,三维 Radon 数据的一阶导数在密度变化较缓的区域中近似满足线性关系,而相同密度部分基本上分布于相同极径处.由此可知,单纯地采用单变量恒定方式寻找到的 Radon 阴影区域边界数据值填充并不能完全反映阴影区域数据的特征,并且往往会对重建图像的其他区域产生影响.所以我们提出一种新的阴影区域填充方法,这种方法既利用阴影边界区域极角数据又利用极径数据计算填充数值,而其数据权重取决于被填充点至边缘数据点的采样距离.填充算法如图 7 所示.

如图 7 所示,对于阴影区域中任意一点 C ,向阴影区域边界作垂线分别交于 $P1 \sim P3$ 点形成 3 条线段,每条线段的长度不同,线段越长表明其距 C 点的位置越远,其对应的边界值对于 C 点的贡献越小.当 C 点处于外边界以外时,填充数据为 0.基于距离权重的变量填充方法的数学表达如公式(8)所示.

$$Rf'(\rho_{shadow}, \bar{n}, \theta_{shadow}) = w(\rho_{shadow}, \theta_{P1})Rf'(\rho_{shadow}, \bar{n}, \theta_{P1}) + w(\rho_{shadow}, \theta_{P2})Rf'(\rho_{shadow}, \bar{n}, \theta_{P2}) + w(\rho, \theta_{shadow})Rf'(\rho, \bar{n}, \theta_{shadow}) \tag{8}$$

其中,

$$\begin{cases} w(\rho_{shadow}, \theta_{p1}) = \frac{n\rho + n\theta_{p2}}{2 \times (n\rho + n\theta_{p1} + n\theta_{p2})} \\ w(\rho_{shadow}, \theta_{p2}) = \frac{n\rho + n\theta_{p1}}{2 \times (n\rho + n\theta_{p1} + n\theta_{p2})} \\ w(\rho, \theta_{shadow}) = \frac{n\theta_{p2} + n\theta_{p1}}{2 \times (n\rho + n\theta_{p1} + n\theta_{p2})} \end{cases} \quad (9)$$

$$n\rho = \frac{|\rho_{shadow} - \rho|}{d\rho}, n\theta_{p2} = \frac{|\theta_{shadow} - \theta_{p2}|}{d\theta}, n\theta_{p1} = \frac{|\theta_{shadow} - \theta_{p1}|}{d\theta} \quad (10)$$

公式(8)中, $Rf'(\rho_{shadow}, \bar{n}, \theta_{p1}), Rf'(\rho_{shadow}, \bar{n}, \theta_{p2})$ 与 $Rf'(\rho, \bar{n}, \theta_{shadow})$ 分别表示阴影区域边缘数据, $n\rho, n\theta_{p2}, n\theta_{p1}$ 表示被填充点到阴影边界点的采样距离. 由于 θ 与 ρ 的物理意义与采样间隔(即 $d\theta, d\rho$)均不相同, 故以采样距离作为衡量标准, 即 $n\rho = \frac{|\rho_{shadow} - \rho|}{d\rho}, n\theta_{p2} = \frac{|\theta_{shadow} - \theta_{p2}|}{d\theta}$ 和 $n\theta_{p1} = \frac{|\theta_{shadow} - \theta_{p1}|}{d\theta}$. 在公式(9)说明了计算距离权重的方法, 通过对距离权重执行归一化处理, 并采用相同的距离标量计算权重. 在公式(10)中, $d\rho$ 和 $d\theta$ 分别表示极径与极角的采样间隔. $\frac{|\rho_{shadow} - \rho|}{d\rho}$ 表示被填充点在极径方向上与边界点的差距, $\frac{|\theta_{shadow} - \theta_{p2}|}{d\theta}$ 与 $\frac{|\theta_{shadow} - \theta_{p1}|}{d\theta}$ 表示被填充点在极角方向与边界点的差距. 根据两个差距的不同调整权重比例, 得到填充数据.

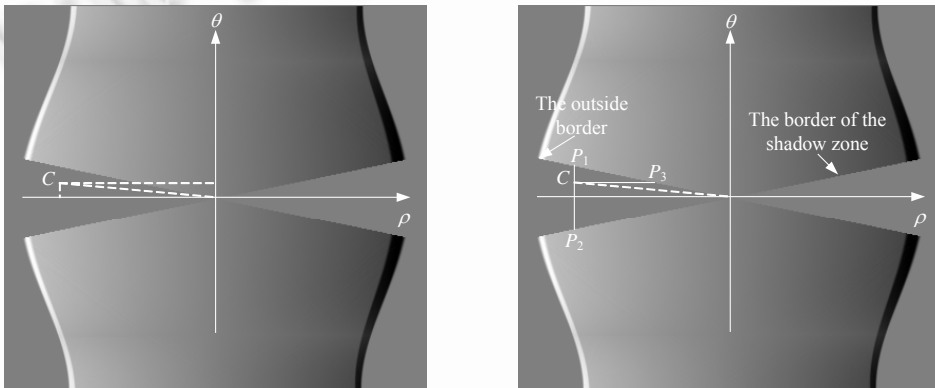


Fig.7 Distance-Weighted interpolation padding method

图 7 基于距离权重插值填充方法

4 实验研究

为了验证本文提出的填充方法的效果, 本文用计算机对 3 种阴影区域填充方法进行了计算机模拟实验. 实验采用 3D Shepp-Logan 头模数据, 操作系统为 Windows XP SP2, 采用 VC++6.0 进行代码实现, 计算机 CPU 为 Intel Geuine 2160, 1.8GHz, 内存为 2GB, 扫描参数见表 1.

Table 1 Reconstruction parameters table

表 1 重建参数表

Field of view/mm	400	Interval of rows/mm	3.0
Source trajectory radius/mm	570	Projections per turn	360
Distance source to detector/mm	1 040	Reconstruction grid	256×256×256
Detector channels	672	Sample number of polar radius	400
Detector rows	512	Sample number of polar radius angle	360
Interval of channels/mm	1.513 918	Number of meridian planes	360

采用 Grangeat 重建算法对生数据进行重建, 分别采用 3 种方式填充 Radon 阴影区域, 得到的结果如图 8 所

示(从左至右分别是零填充方法、极径常数填充方法、极角常数填充方法、距离权重填充方法;由上至下分别为 Radon 一阶导数图像(包含阴影区域)、填充后的 Radon 二阶导数图像、子午面反投影图像、矢状面反投影图像(y=159slice,显示范围是 0.96~1.1)).

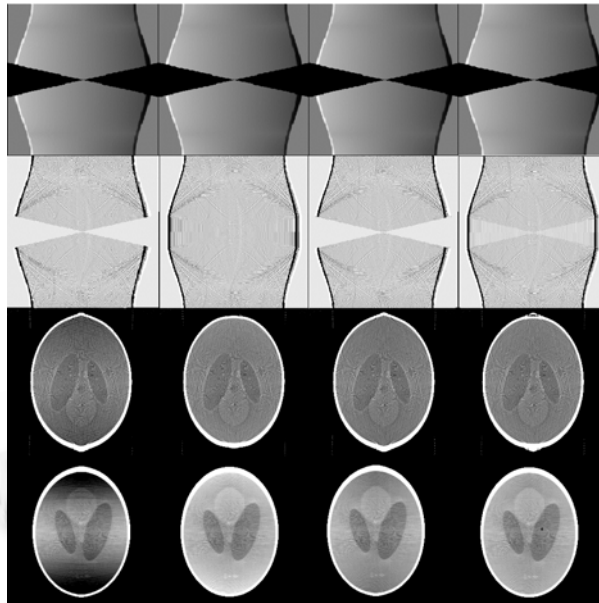


Fig.8 Reconstruction images using different padding methods
图 8 不同阴影区域填充方法重建图

图 8 中,第 1 行为没有进行填充的 Radon 子午面数据,其中存在着数据为空的阴影区域,第 2 行图像是用不同填充算法填充后的 Radon 二阶导数数据,第 3 行为对子午面反投影后得到的重建图像,最后一行为重建图像的矢状面图像.由矢状面图像可以发现,采用极径常数填充方法重建的图像在高纬度区域的区域中出现明显的密度升高现象,采用极角常数填充方法重建的图像在高纬度区域仍然存在着密度降低伪影,而采用本文提出的距离权重变量填充方法重建图像在纬度方向上重建效果良好,未见明显的密度变化现象.分别取 4 组矢状面图像的中心线获得强度曲线如图 9 所示.

图 9 可以定量地反映重建图像与模体的差别:高纬度部分零填充的结果最差,密度降低伪影最为严重,并且由于 Radon 数据缺失严重而出现明显的褶皱伪影;基于极角常数的填充方法在高纬度区域已经具有了填充效果,其图像的变化规律也基本上与模体一致,但高纬度区域仍然有密度降低现象,说明 Radon 阴影区域没有被完全填满;基于极径的填充方法在高纬度处则有明显的密度升高现象;本文提出的算法结合了前两种算法的特点,同时将阴影区域中被填充点与 3 个相关边界点有效地联系起来,在高纬度区域基本上与模体数据一致,达到了抑制高纬度密度降低伪影的目的.

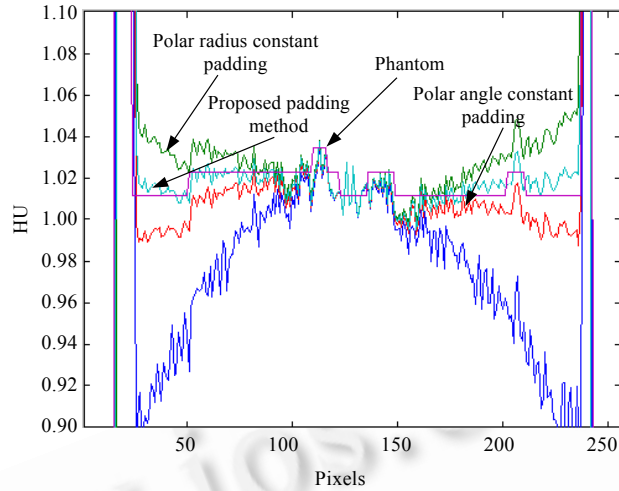


Fig.9 Profile of middle of the images

图 9 中心处的强度曲线图

5 结 论

本文分析并解释了圆轨迹锥束扫描阴影区域形成的原因及对重建图像的影响;阐述了圆轨迹 Grangeat 重建算法的实现步骤以及算法流程;分析了采用 Grangeat 重建算法对圆轨迹扫描阴影区域填充的可行性和优势;提出了基于提出的基于距离权重的阴影区域填充方法.本文的主要贡献有以下几点:

- 分析了 Grangeat 重建算法在子午面的数据分布关系.
- 比较分析了基于极角与极径填充方式的特点及不足.
- 提出了基于距离权重的阴影区域填充方法.该方法是一种新的填充 Radon 区域数据缺失的方法.这种填充方法比原有的手段具有更好的重建效果.
- 用计算机模拟的方式比较了 3 种填充方式的结果.

我们将在未来的研究中主要关注 3 方面的问题:

- (1) Grangeat 重建算法实现过程涉及大量的插值与重排运算,并且子午面数据的采样率直接影响到重建图像效果,目前研究中的重建图像存在着褶皱、条状、V 型伪影,我们将继续研究实现方法以提高 Grangeat 重建算法的速度和效果.
- (2) 文献[9]中除了本文分析的两种填充方法以外,还提出了两种方法的二次插值方法.这两种方法并非新的填充方式,而是优化手段,故没有在本文中提出.在未来的研究中,我们同样会对采用二次插值方法优化填充过程以得到更好的填充效果方法进行研究.
- (3) Grangeat 重建算法为圆轨迹阴影区域填充提供了新的道路,这也将对 FDK 类算法具有指导意义,我们将继续研究 Grangeat 算法与 FDK 类算法的联系,提出更好的高纬度密度降低伪影的解决方法.

致谢 感谢审稿专家对本文提出的宝贵建议.

References:

- [1] Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam reconstruction. Journal of the Optical Society of America, 1984,1(6): 612-619.

- [2] Tuy HK. An inversion formula for cone-beam reconstruction. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1983,43(3): 546–552.
- [3] Grass M, Köhler T, Proksa R. 3D cone-beam CT reconstruction for circular trajectories. Physics in Medicine and Biology, 2000, 45(2):329–347.
- [4] Grass M, Köhler T, Proksa R. Weighted hybrid cone beam reconstruction for circular trajectories. In: Merell D, Surget J, Ulma M, eds. Proc. of the 2000 IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Record. Danvers: IEEE, 2000.
- [5] Hu H. A new cone beam reconstruction algorithm for the circular orbit. In: Trendler RC, ed. Proc. of the 1994 IEEE Conf. Record. Norfolk: IEEE, 1994. 1261–1265.
- [6] Zheng H, Chen ZK, Kang Y, Liu JR. A new heuristic weighting function for FDK-based reconstruction of cone beam tomography. In: Peng Y, Weng XH, eds. Proc. of the 7th Asian-Pacific Conf. on Medical and Biological Engineering. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 206–209.
- [7] Chen ZK, Ning RL. Filling the Radon domain of computed tomography by local convex combination. Applied Optics, 2003,42(35): 7043–7051.
- [8] Grangeat P. Mathematical framework of cone beam 3D reconstruction via the first derivative of the Radon transform. In: Herman GT, Louis AK, Natterer F, eds. Proc. of the Mathematical Methods in Tomography. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 66–97.
- [9] Lee SW, Cho G, Wang G. Artifacts associated with implementation of the Grangeat formula. Medical Physics, 2002,29(12): 2871–2880.
- [10] Lee SW, Wang G. A Grangeat-type half-scan algorithm for cone-beam CT. Medical Physics, 2003,30(4):689–700.
- [11] Lee SW, Wang G. Grangeat-Type helical half-scan computerized tomography algorithm for reconstruction of a short object. Medical Physics, 2004,31(1):4–16.



郑晗(1981—),男,辽宁沈阳人,博士生,主要研究领域为锥束 CT 重建算法。



康雁(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为医学影像处理。



陈自宽(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为锥束 CT 重建算法,医学影像处理。



刘积仁(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机应用技术,医学影像处理技术。